

PEMETAAN KERENTANAN TANAH LONGSOR MENGGUNAKAN METODE *FREQUENCY RATIO* (FR) DI KABUPATEN PACITAN

Aris Mukiyono¹, Gabriel Listyawan¹

¹Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Jawa Timur
e-mail : arismukiyono1@gmail.com

Abstrak. Tanah longsor merupakan salah satu bencana hidrometeorologis yang mengakibatkan bermacam kerusakan seperti kerugian ekonomi, kerusakan lingkungan hingga korban jiwa. Salah satu wilayah di Jawa Timur yang cukup sering dilanda longsor adalah Kabupaten Pacitan. Analisis kerentanan tanah longsor dengan menggunakan metode *frequency ratio* (FR) dan *overlay* sistem informasi geografis merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk memetakan persebaran kerentanan tanah longsor suatu daerah berdasarkan data historis serta faktor pemicunya. Untuk membangun model kerentanan tanah longsor, digunakan 473 data titik longsor, sebanyak 70% digunakan untuk *data training* dan 30 % sisanya untuk *data testing*, selain itu digunakan data kemiringan lereng, arah lereng, bentuk lereng, jarak dari sungai, tataguna lahan, jarak dari struktur, jenis batuan dan curah hujan untuk membantu penyusunan model kerentanan tanah longsor. Analisis FR menunjukkan bahwa daerah penelitian dapat dibagi menjadi 4 (empat) zona kerentanan, yaitu zona kerentanan sangat rendah, rendah, menengah, dan tinggi. Hasil validasi dengan menggunakan metode “*Area Under Cover* (AUC)” dari “*Receiver Operating Characteristics* (ROC)” menunjukkan hasil 0,888 untuk *prediction rate* dan 0,843 untuk *success rate*, sehingga model tergolong sangat baik.

Kata Kunci: frequency ratio, kabupaten pacitan, kerentanan tanah longsor, sistem informasi geografis

Abstract. Landslides are one of the hydrometeorological disaster that cause various damages such as economic losses, environmental damage and fatalities. Pacitan Regency is one of the areas in East Java with high landslides potency. Landslide susceptibility analysis using frequency ratio (FR) method and GIS overlay is an approach that can be used to identify the distribution of landslide susceptibility in an area based on historical data and its triggering factors. 473 landslide points were used to build landslide susceptibility model, 70% of the data were used for training data and the remaining 30% for testing data, in addition, slope, aspect, curvature, distance from rivers, land use, distance from structures, rock types/lithology and rainfall were used to build landslide susceptibility model. FR analysis shows that the research area can be divided into 4 (four) susceptibility zones, very low, low, medium, and high susceptibility zones. The validation results using the “*Area Under Cover* (AUC)” method from “*Receiver Operating Characteristics* (ROC)” showed results of 0.888 for the prediction rate and 0.843 for the success rate, so the model is classified as very good.

Keywords: frequency ratio, geographic information system, pacitan regency, landslide susceptibility

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Tanah longsor didefinisikan sebagai suatu peristiwa atau rangkaian peristiwa pergerakan tanah atau batuan menuruni lereng akibat tarikan gravitasi. Tanah longsor merupakan bahaya besar bagi aktivitas manusia yang terkadang mengakibatkan kerugian ekonomi dan kerusakan harta benda yang besar karena dapat mengancam permukiman, mata pencaharian, infrastruktur dan transportasi di berbagai daerah di dunia (Das, 2011). Berdasarkan Kajian Resiko Bencana Nasional Provinsi Jawa Timur Tahun 2022-2026, sejak tahun 2009 – 2019 sebanyak 16,6% bencana yang terjadi di Jawa Timur adalah bencana tanah longsor, dengan total kejadian bencana yang dilaporkan sebanyak 671 kejadian, dan cenderung akan meningkat setiap tahunnya. Kejadian longsor tersebut pada umumnya dipicu oleh berbagai faktor eksternal seperti hujan lebat, getaran gempa bumi, perubahan muka air, badai, dan erosi sungai, selain itu campur tangan manusia melalui pembukaan lahan di kawasan perbukitan untuk pembukaan jalan, pertanian, permukiman turut andil menyebabkan ketidakstabilan.

Analisis kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility analysis*) merupakan suatu pendekatan untuk menghitung volume area serta kemungkinan terjadinya longsor dengan memberikan estimasi relatif kejadian longsor pada suatu wilayah berdasarkan kondisi setempat. Untuk mengidentifikasi daerah dengan resiko

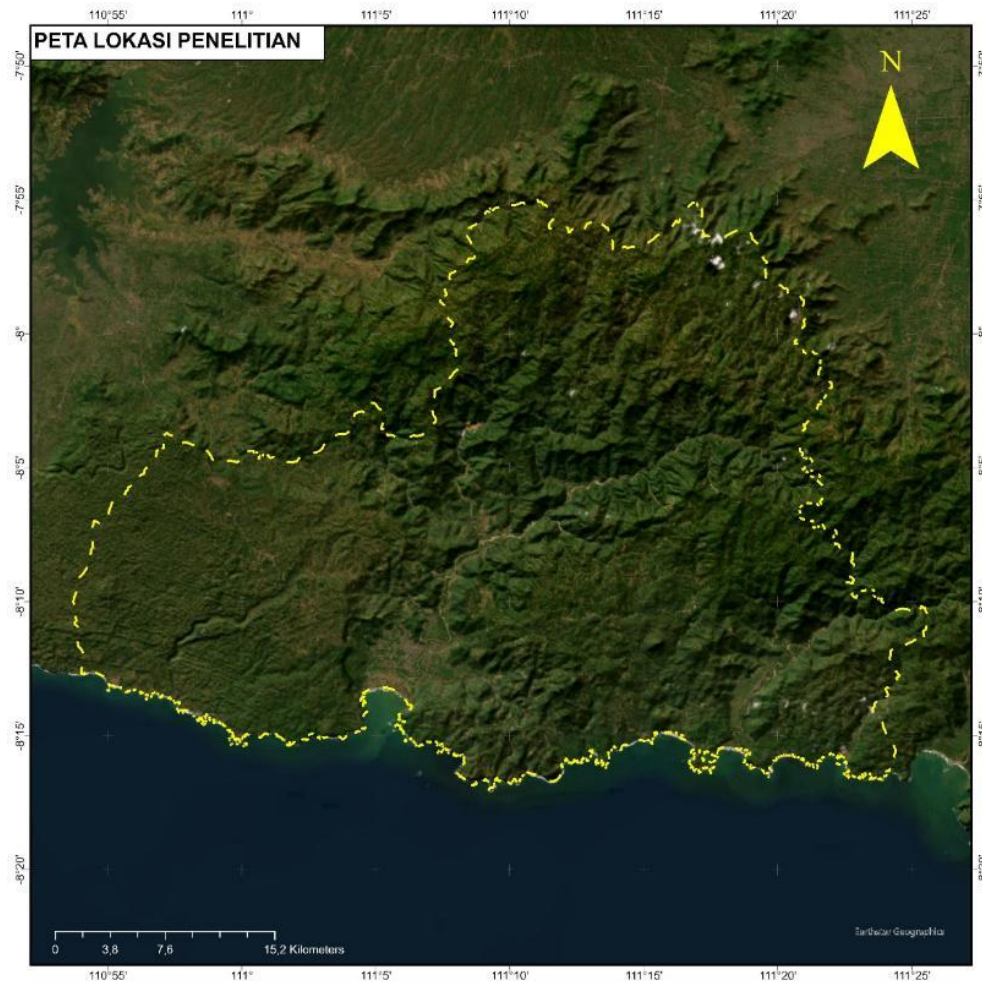
longsor yang tinggi diperlukan evaluasi distribusi dan frekuensi dari longsor terdahulu yang dapat dipetakan secara efisien dengan memanfaatkan Sistem Informasi Geografis (SIG) (Silalahi dkk., 2019). Analisis kerentanan tanah longsor seringkali dipetakan dengan menggunakan pendekatan statistik, dapat berupa pendekatan statistik *bivariat* maupun statistik *multivariat*. Statistik *bivariat* bertujuan untuk mendeteksi korelasi antara variable x dan y. Dalam konteks tanah longsor, metode statistik *bivariat* yang sering digunakan adalah *Frequency Ratio Analysis* (FR), *Weighted Overlay Method* (WoM), dan *Information Value Method* (IV). *Frequency Ratio Analysis* (FR) merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk penilaian kerentanan tanah longsor oleh berbagai ilmuwan di dunia. Analisis FR dimanfaatkan dengan menggunakan dua variabel. Pendekatan ini memungkinkan untuk memetakan secara detail distribusi spasial longsor dan faktor penyebabnya (Sisay dkk., 2024). Pada analisis FR, nilai FR yang dihitung menunjukkan derajat korelasi antara longsor dengan kelas faktor penyebab longsor tertentu. Nilai 1 merupakan nilai rata-rata kejadian longsor pada kelas faktor penyebab longsor tertentu. Nilai lebih dari 1 menunjukkan korelasi yang kuat dan korelasi positif serta probabilitas terjadinya longsor yang tinggi, sedangkan nilai kurang dari 1 menunjukkan hubungan negatif dan probabilitas terjadinya longsor yang rendah pada golongan faktor penyebab longsor tertentu (Mersha dan Meten, 2020).

Analisis kerentanan tanah longsor merupakan suatu alat bantu yang penting untuk manajemen resiko tanah longsor, dasar pertimbangan bagi praktisi dan pembuat keputusan untuk dapat merencanakan secara lebih tepat terhadap rencana tata ruang dan strategi mitigasi resiko (meliputi monitoring dan sistem peringatan dini). Studi ini bertujuan untuk menilai dan memetakan kerentanan tanah longsor di Kabupaten Pacitan menggunakan penggabungan metode geospasial dan metode statistik untuk mengidentifikasi persebaran kerentanan longsor, serta mengetahui kontribusi faktor-faktor seperti morfologi, geologi, meteorologi serta tata ruang terhadap terjadinya longsor. Metode *Frequency Ratio* (FR) dipilih dikarenakan kesederhanaan perhitungan matematis yang digunakan, keterdapat data dan waktu yang ada, serta kemampuan model untuk menggambarkan kondisi lapangan dengan baik melalui pembagian zonasi kerentanan yang didasarkan pada validasi dengan data longsor historis.

Daerah Penelitian

Lokasi penelitian berada di Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur yang membentang mulai dari 7°55'-8°17' LS dan 110°55'-111°25' BT dengan luas administratif 1.389,87 km², berbatasan dengan Kabupaten Ponorogo dan Kabupaten Wonogiri di Utara, Kabupaten Trenggalek di Timur, Kabupaten Wonogiri di Barat dan Samudra Hindia di Selatan. Kabupaten Pacitan terbagi menjadi 12 kecamatan yang terdiri atas 5 kelurahan dan 166 desa, yang sebagian besar daerahnya berupa perbukitan dan pegunungan yang termasuk dalam bagian dari deretan Pegunungan Seribu (BPS Kabupaten Pacitan, 2024). Adapun morfologi perbukitan mencakup sekitar 80% dari luas wilayah penelitian, dengan bukit dan gunung kecil yang menjulang hingga ketinggian 800 mdpl. Kontrol struktur berupa sesar, kekar juga cukup jelas terlihat dalam pembentukan morfologi Kabupaten Pacitan, yang nampak dalam aliran sungai-sungai besarnya seperti Sungai Grindulu, Sungai Bawur, Sungai Pagotan, Sungai Lorog, dan Sungai Baksoko (BPBD Kabupaten Pacitan, 2022).

Apabila dilakukan pengamatan dengan lebih detail menggunakan citra satelit dari *Google Earth Pro* terdapat perbedaan bentuk morfologi antara bagian utara daerah penelitian dan bagian selatan daerah penelitian. Morfologi bagian utara cenderung dikontrol oleh struktur geologi dan jenis batuan terobosan, dan batuan sedimen yang terpengaruh oleh aktivitas vulkanik sedangkan pada bagian selatan cenderung dikontrol oleh bentang alam karst dan pelarutannya oleh air, yang kenampakannya di lapangan seperti bukit karst, gua karst hingga sungai bawah tanah.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian yang berada di Kabupaten Pacitan

METODOLOGI

Data

Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan menggunakan data primer dan data sekunder yang tersedia. Data primer yang digunakan merupakan data yang diambil secara langsung di lapangan, sedangkan data sekunder yang digunakan merupakan data yang diambil dari berbagai sumber seperti institusi pemerintah dan *open-access data*. Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

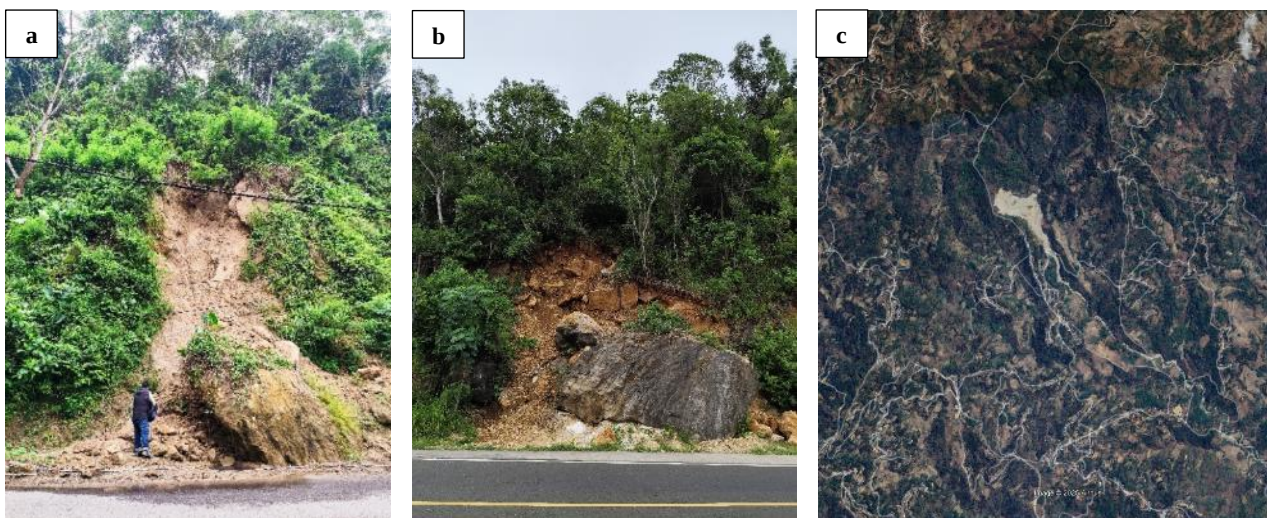
Tabel 1. Jenis data yang digunakan dalam penelitian

No.	Jenis Data	Skala	Tipe Data	Jenis Data
1	Titik Koordinat Longsor	-	Point	Data Primer
2	Digital Elevation Model (DEM) SRTM	30 x 30 m	Raster	Data Sekunder
3	Peta Rupa Bumi Indonesia	1:25.000	Polygon, Line, Point	Data Sekunder
4	Peta Geologi Regional	1:100.000	Polygon	Data Sekunder
5	Curah Hujan	mm/tahun	Point, Table	Data Sekunder

Metode Penelitian

Analisis kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility analysis*) dilaksanakan melalui empat tahapan utama, yaitu preparasi dan pengumpulan data, pembentukan model faktor-faktor yang mempengaruhi tanah

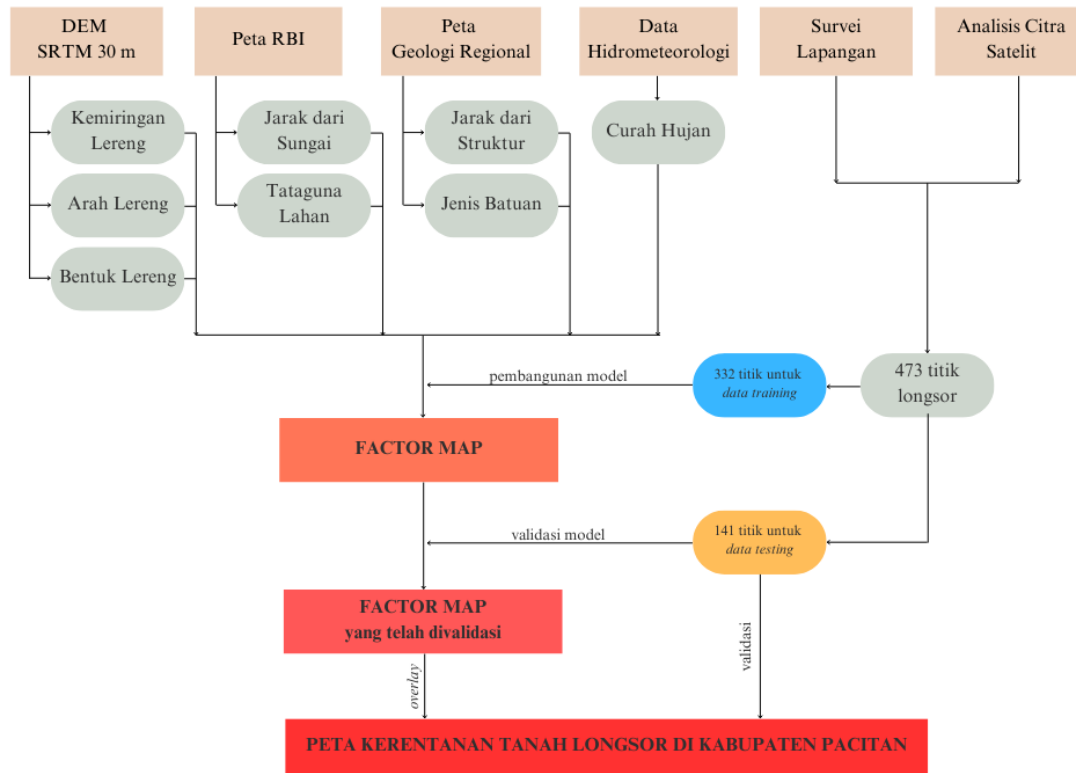
longsor, analisis kerentanan tanah longsor berdasarkan hubungan antara data historis longsor terdahulu dan faktor-faktor yang mempengaruhi tanah longsor, dan yang terakhir adalah validasi data (Guzzetti dkk. (1999). Adapun analisis kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility analysis*) didasarkan pada asumsi bahwa tanah longsor akan cenderung terjadi pada wilayah yang memiliki kondisi geologi, geomorfologi, hidrogeologi, dan iklim tertentu yang bertanggung jawab terhadap kejadian tanah longsor terdahulu dan masa kini (Yang dkk., 2016). Data tanah longsor yang digunakan pada penelitian ini berasal dari berbagai sumber, termasuk di dalamnya adalah data sekunder seperti data titik longsor terdahulu dari BPBD Provinsi Jawa Timur serta analisis citra satelit resolusi tinggi yang tersedia di *Google Earth Pro*, dan data primer yang didapat dari identifikasi lapangan. Citra satelit yang tersedia di *Google Earth Pro* dapat menjadi sumber terpercaya terutama untuk pemetaan titik longsor pada lokasi yang tidak memiliki akses yang baik seperti daerah terpencil. Contoh pengambilan data titik longsor secara langsung di lapangan dapat dilihat pada Gambar 2(a,b), sedangkan pengambilan data titik longsor memanfaatkan citra satelit dapat dilihat pada Gambar 2 (c). Sebagian besar metode statistik yang digunakan untuk prediksi distribusi spasial tanah longsor dikorelasikan dengan kumpulan data dengan kasus positif dan kasus negatif. Nilai positif diambil dari suatu piksel yang salah satu atau seluruhnya memiliki kasus tanah longsor, sedangkan nilai negatif biasanya diambil secara acak sebagai suatu piksel yang tidak memiliki kasus tanah longsor. Kemudian, model kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility map*) dikalibrasi dan divalidasi dengan memanfaatkan sampel data yang berbeda, tetapi dari area studi yang sama, dengan melakukan pembagian acak antara nilai positif dan negatif (Chung dan Fabbri, 2003).



Gambar 2. Mekanisme pengambilan data lapangan (a,b), dan Identifikasi citra satelit (c)

Dalam penelitian ini, Data *Digital Elevation Model SRTM* Resolusi 30 meter diolah dengan *ArcGIS Pro* versi 3.3 untuk memperoleh data kemiringan lereng, arah lereng, bentuk lereng. Selanjutnya, digunakan data-data dari Peta Rupa Bumi Indonesia untuk kemudian diolah menjadi data sebaran sungai dan tataguna lahan. Penelitian juga memanfaatkan Peta Geologi Regional untuk memperoleh data mengenai jenis batuan dan sebaran struktur geologi di lokasi penelitian. Selain itu digunakan pula data hidrometeorologi seperti curah hujan. Lebih lanjut lagi, total sebanyak 473 titik tanah longsor diambil dan digunakan untuk membangun model kerentanan tanah longsor di Kabupaten Pacitan. Sebanyak 332 titik longsor (70%) digunakan sebagai *data training* yang berfungsi untuk membangun model, sedangkan 141 titik longsor (30%) digunakan sebagai *data testing* tidak digunakan dalam pembangunan model melainkan sebagai alat validasi dari model yang telah tersusun.

Penyusunan model kerentanan tanah longsor disusun dengan menggunakan berbagai faktor dari data yang telah disebutkan sebelumnya melalui metode *overlay* dengan memanfaatkan *ArcGIS Pro* versi 3.3 yang disesuaikan dengan menggunakan analisis *Frequency Ratio* (FR). Adapun model yang dihasilkan dari proses *overlay* tersebut kemudian divalidasi dengan menghitung nilai *Area Under Cover* (AUC). Secara ringkas, alur jalannya penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart penelitian analisis kerentanan tanah longsor metode *Frequency Ratio* (FR)

Frequency Ratio Analysis (FR)

FR merupakan sebuah metode statistik yang mengevaluasi kemungkinan terjadinya suatu kejadian dengan mengukur rasio antara area suatu kejadian dan total area berdasarkan faktor penyebabnya (Fadilah dkk., 2019). Perhitungan nilai FR didasarkan pada hubungan antara distribusi spasial dan faktor penyebab tanah longsor yang secara matematis dapat dirumuskan pada persamaan 1.

$$FR = \frac{N_{pix}(LX_i) / \sum_{i=1}^m N_{pix}(LX_i)}{N_{pix}(X_j) / \sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)} \quad (1)$$

dimana FR adalah rasio frekuensi kelas i dari parameter j , $N_{pix}(LX_i)$ adalah jumlah piksel longsor dalam kelas i dari parameter X , $N_{pix}(X_j)$ adalah jumlah piksel dari parameter X_j , m adalah jumlah kelas pada variabel X_i , n adalah jumlah parameter pada area studi (Regmi dkk., 2014).

Langkah selanjutnya adalah melakukan normalisasi dari nilai FR dalam range 0 – 1 yang disebut dengan Relative Frequency (RF) yang dapat dirumuskan pada persamaan 2.

$$RF = \frac{FR_{ij}}{\sum_{i=1}^m FR_{ij}} \quad (2)$$

dimana FR_{ij} adalah nilai FR pada suatu kelas i dari parameter j dan $\sum_{i=1}^m FR_{ij}$ adalah jumlah total FR pada semua kelas pada parameter j .

Selanjutnya dilakukan penghitungan nilai *Prediction Rate* (PR) yang dirumuskan pada persamaan 3.

$$PR = \frac{(RF_{max} - RF_{min})}{(RF_{max} - RF_{min})_{min}} \quad (3)$$

Untuk menentukan Indeks Kerentanan Tanah Longsor sebagai model kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility map*), secara matematis dapat dirumuskan pada persamaan 4.

$$LSI = \sum (PR \times RF) \quad (4)$$

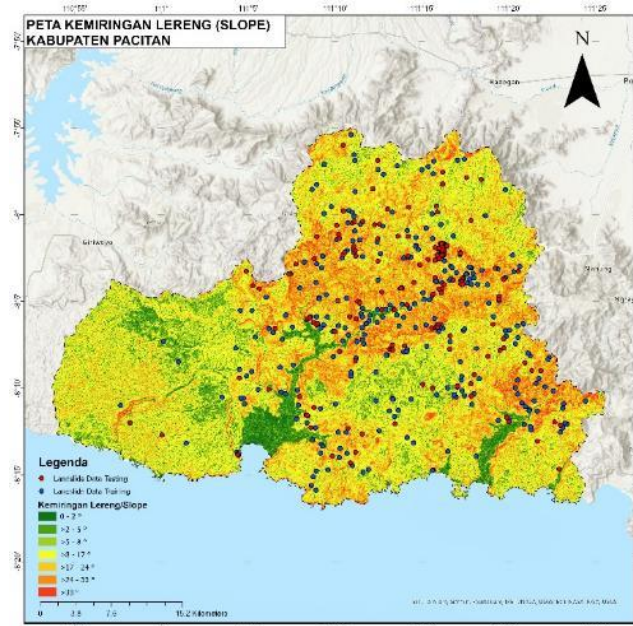
Perlu diingat bahwa hasil akhir dari model kerentanan tanah longsor tersebut harus divalidasi dengan menggunakan *data testing* untuk menentukan akurasi dan performa model untuk menggambarkan kondisi lapangan. Mekanisme validasi yang umum digunakan adalah *Receiver Operating Characteristic* (ROC). ROC merupakan kurva yang menunjukkan perbandingan sensitivitas dan spesifisitas yang menunjukkan perubahan dinamis pada suatu hasil klasifikasi. Kurva ROC tersebut dievaluasi berdasarkan nilai *Area Under the Curve* (AUC) yang merupakan luasan area antara sumbu x dan kurva ROC. Nilai AUC berkisar antara 0,5 – 1, dimana semakin tinggi nilainya, semakin baik prediksi suatu model (Acharya dan Lee, 2019). Secara lebih detail nilai AUC terbagi menjadi 0,5 – 0,6 (*poor*), 0,6 – 0,7 (*average*), 0,7 – 0,8 (*good*), 0,8 – 0,9 (*very good*), dan >0,9 (*excellent*) (Regmi dkk., 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Factor Map

a. Kemiringan Lereng/Slope

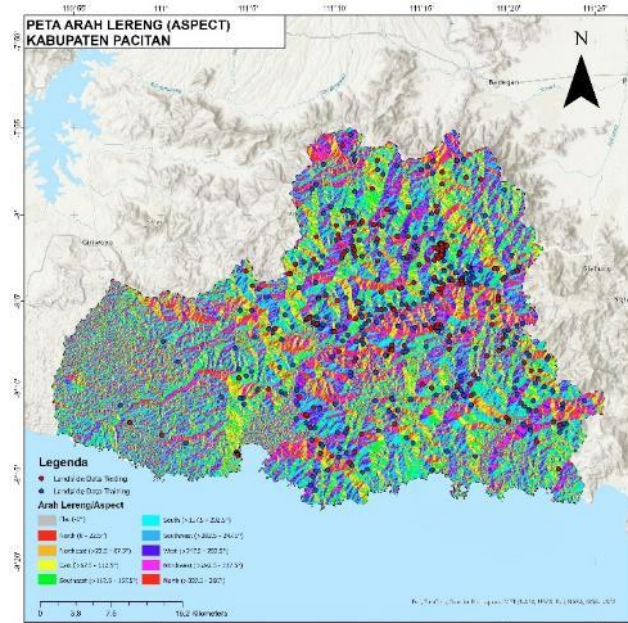
Kemiringan lereng merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi terjadinya tanah longsor karena mengontrol pergerakan gravitasional suatu material. Kondisi kemiringan lereng sangat berkaitan erat dengan faktor lainnya, tingkat kerawanan longsor akan semakin tinggi apabila terdapat faktor pemicu seperti curah hujan tinggi, getaran, atau aktivitas manusia seperti penggalian, pemuatan, dan lain lain (Silalahi dkk., 2019). Data kemiringan lereng diperoleh melalui analisis *Digital Elevation Model*, kemudian diklasifikasikan berdasarkan klasifikasi USDA yang membagi wilayah penelitian menjadi 7 kelas, yaitu datar (0–2°), landai (>2–5°), agak miring (>5–8°), berbukit (>8–17°), agak terjal (>17–24°), terjal (>24–33°) dan sangat terjal (>33°). Adapun wilayah Kabupaten Pacitan didominasi oleh tingkat kemiringan lereng berbukit – sangat terjal terutama pada bagian timur. Pada bagian tersebut juga banyak dijumpai longsor-longsor terdahulu. Adapun persebaran kemiringan lereng di Kabupaten Pacitan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Distribusi kemiringan lereng di daerah penelitian

b. Arah Lereng/Aspect

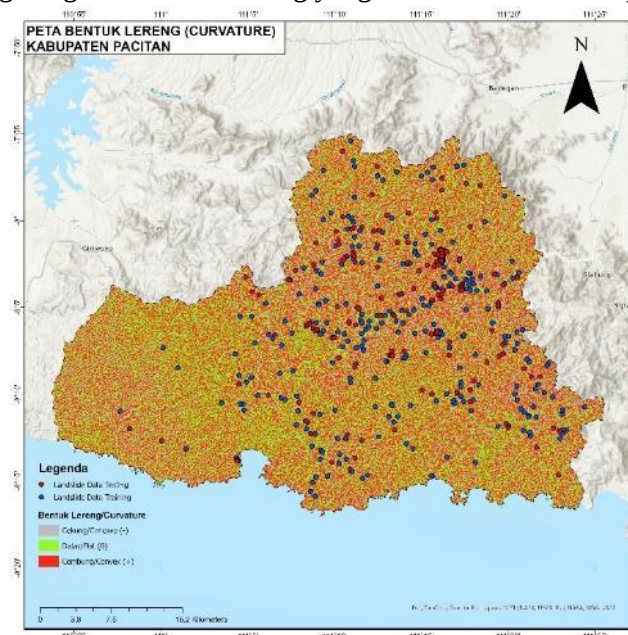
Data arah lereng diperoleh melalui analisis *Digital Elevation Model* yang kemudian dibagi menjadi 10 kelas, yaitu *Flat* (-1°), *North* ($0-22,5^\circ$), *Northeast* ($>22,5-67,5^\circ$), *East* ($>67,5-112,5^\circ$), *Southeast* ($>112,5-157,5^\circ$), *South* ($>157,5-202,5^\circ$), *Southwest* ($>202,5-247,5^\circ$), *West* ($>247,5-292,5^\circ$), *Northwest* ($>292,5-337,5^\circ$), *North* ($>337,5-360^\circ$). Persebaran arah lereng di lokasi penelitian dapat dilihat di Gambar 5.



Gambar 5. Sebaran arah lereng di daerah penelitian

c. Bentuk Lereng/Curvature

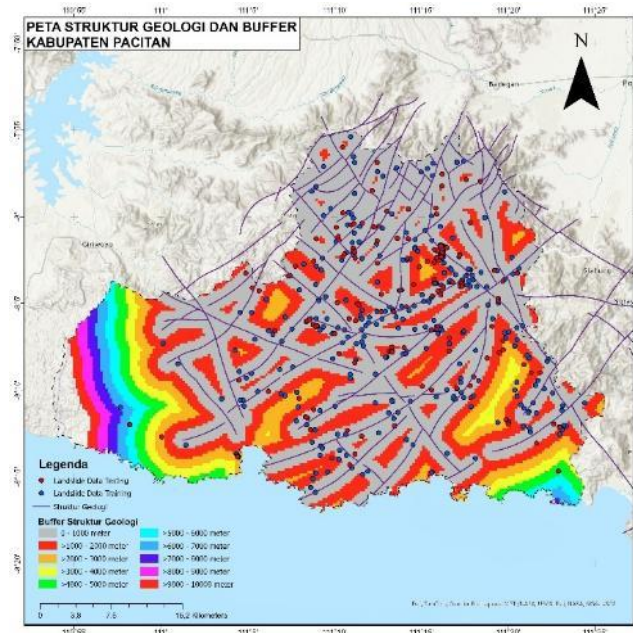
Lereng dengan bentuk cekung dan cembung akan cenderung memiliki lebih banyak air yang bisa berdampak pada semakin tingginya potensi terjadi longsor (Mersha dan Meten, 2020). Dalam penelitian ini data bentuk lereng diekstraksi dari *Digital Elevation Model*, yang kemudian diklasifikasikan menjadi Cekung/*Concave* (nilai raster negatif), Cembung/*Convex* (nilai raster positif), dan Datar/*Flat* (nilai raster nol). Bentuk lereng di daerah penelitian didominasi oleh bentuk datar dan cembung, kejadian longsor dominan terjadi pada lereng dengan bentuk cembung yang secara lebih detail dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Bentuk lereng di daerah penelitian

d. Jarak dari Struktur

Keberadaan struktur geologi menjadi suatu zona lemah bagi batuan yang bisa menyebabkan pecahnya struktur batuan, memperburuk stabilitas batuan dan lereng, yang dapat meningkatkan probabilitas terjadinya tanah longsor. Secara umum, semakin dekat jarak dengan struktur geologi, semakin besar kemungkinan terjadinya tanah longsor (Gao dkk., 2022). Analisis jarak dari struktur geologi dilakukan dengan memanfaatkan data struktur geologi regional dari Peta Geologi Regional Lembar Pacitan Jawa (Pacitan-1507-4), Lembar Ponorogo Jawa (Ponorogo-1508-1), Lembar Surakarta-Giritontro Jawa (Surakarta 1408-3 dan Giritontro 1407-6) , menghasilkan 10 kelas (lihat Gambar 7), dengan dominasi sebanyak 58,57% kejadian tanah longsor terjadi pada jarak 1.000 meter dari struktur.



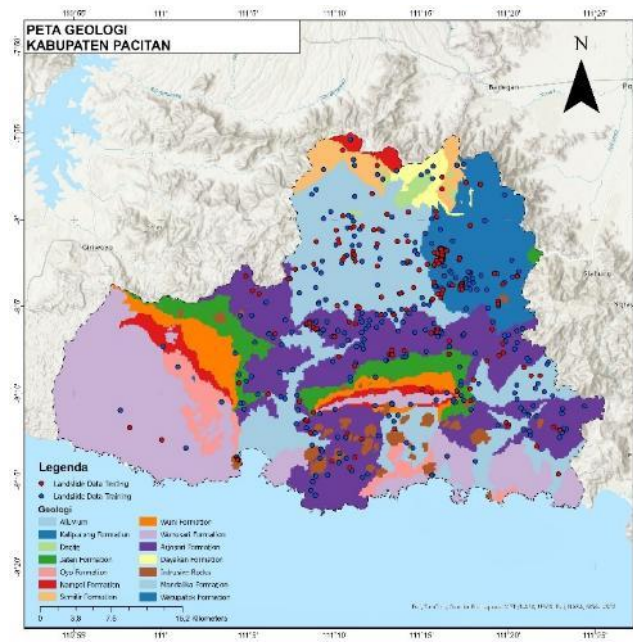
Gambar 7. Sebaran struktur geologi dan wilayah *buffer*-nya yang menunjukkan jarak dari struktur tersebut

e. Jenis Batuan/*Geology*

Litologi batuan memainkan peranan penting dalam kestabilan lereng, dikarenakan setiap jenis batuan memiliki karakteristik yang berbeda (Yalcin dan Bulut, 2007). Batuan yang berbeda akan memiliki tekstur, komposisi, struktur yang berbeda yang berpengaruh terhadap kekuatan batuan. Data yang digunakan dalam analisis jenis batuan untuk penelitian ini berasal dari Peta Geologi Regional Lembar Pacitan Jawa (Pacitan-1507-4), Lembar Ponorogo Jawa (Ponorogo-1508-1), Lembar Surakarta-Giritontro Jawa (Surakarta 1408-3 dan Giritontro 1407-6).

Berdasarkan peta tersebut, lokasi penelitian kebanyakan didominasi oleh batuan karbonatan dari Formasi Wonosari (Tmwl) yang berumur Miosen Akhir – Pliosen; batuan sedimen yang dipengaruhi aktivitas vulkanik seperti konglomerat, batupasir, batulanau, breksi gunung api, lava dan tuff dari Formasi Arjosari (Toma) yang berumur Oligosen – Miosen Awal; serta batuan vulkanik seperti breksi gunung api, lava, tuff dan sedimen yang terpengaruh aktivitas vulkanik seperti batupasir tufan, batulanau dan batulempung dari Formasi Mandalika (Tomm) yang berumur Miosen Awal.

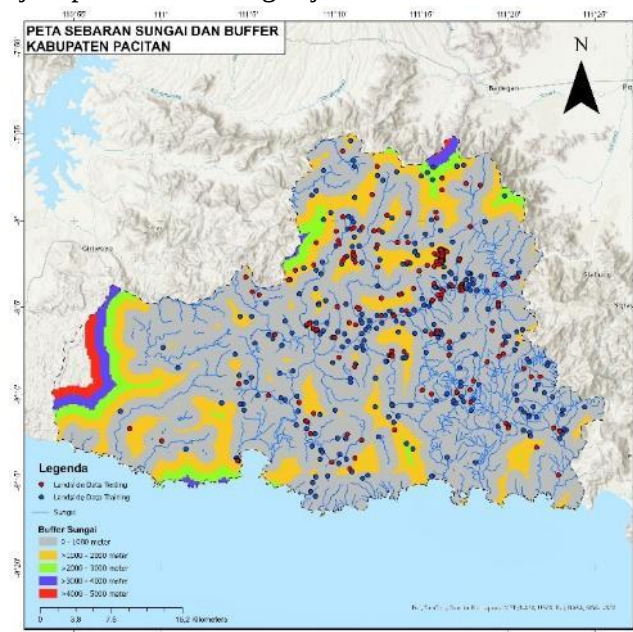
Apabila dilihat dari persebaran titik longsor, Formasi Wonosari yang tersebar di bagian barat cenderung memiliki kekuatan batuan yang relatif tahan terhadap pergerakan material (dibuktikan dengan sedikitnya titik longsor historis pada formasi tersebut), sebaliknya Formasi Arjosari dan Formasi Mandalika cenderung rentan terhadap pergerakan material dibuktikan dengan banyaknya sebaran titik longsor historis pada formasi tersebut. Persebaran jenis batuan di lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Sebaran jenis batuan di lokasi penelitian, nampak pada Formasi Wonosari (ungu muda) sebaran titik longsor cenderung lebih sedikit dibandingkan Formasi Arjosari (ungu tua) dan Formasi Mandalika (biru muda) menunjukkan perbedaan pada karakteristik batuan

f. Jarak dari Sungai

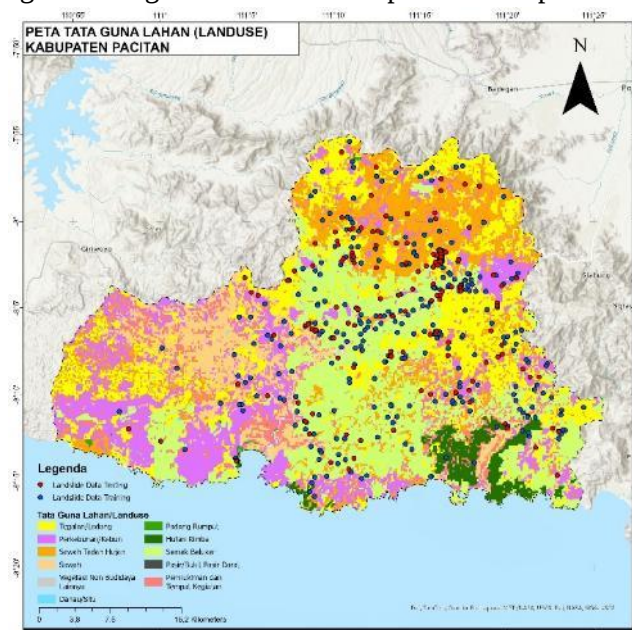
Keberadaan sungai pada suatu wilayah memberikan pengaruh terhadap perubahan bentang alam akibat erosi serta indikator terjadinya longsor. Keberadaan sungai dengan jaringan alirannya mampu mengikis dasar suatu lereng dan menyebabkan kejenuhan bagian dasar lereng yang berdampak pada longsor (Akgun dan Türk, 2010). Adapun sungai yang memberikan pengaruh besar terhadap perubahan bentang alam di Pacitan adalah Sungai Grindulu yang mengalir dari timur ke barat-selatan. Adapun pada bagian perbukitan, dapat dijumpai sungai intermiten yang muncul akibat aliran air hujan pada lembah suatu lereng yang bergerak secara gravitasional. Dalam penelitian ini, analisis jarak dari sungai dihitung dengan memanfaatkan data jaringan sungai dari Peta Rupa Bumi Indonesia Skala 1:25.000. Dari hasil analisis dihasilkan 5 kelas, dimana bencana tanah longsor didominasi terjadi pada daerah dengan jarak 1.000 meter dari aliran sungai (lihat Gambar 9).



Gambar 9. Sebaran aliran sungai dan *buffer*-nya, kejadian longsor didominasi pada jarak 0-1.000 meter

g. Tata Guna Lahan/Landuse

Salah satu penyebab utama dari tanah longsor adalah perubahan penutup lahan karena aktivitas manusia seperti penebangan hutan, pertanian intensif serta pembukaan lahan di daerah berlereng curam dapat memicu ketidakstabilan lereng yang berdampak pada terjadinya tanah longsor (Mersha dan Meten, 2020). Daerah yang memiliki vegetasi lebat cenderung memiliki kemampuan yang baik untuk menahan pergerakan tanah diakibatkan oleh sistem jaringan akar tanaman, sebaliknya lereng cenderung rentan apabila tidak memiliki tutupan vegetasi terutama saat hujan lebat yang bisa menghasilkan aliran permukaan (Silalahi dkk., 2019). Data tata guna lahan yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Peta RBI skala 1:25.000 produksi Badan Informasi Geospasial. Lokasi penelitian didominasi oleh Semak Belukar (25,95%) dan Tegalan/Ladang (22,84%) dan tanah longsor paling banyak terjadi di tata guna lahan berupa semak belukar yang berkontribusi terhadap 38,9% kejadian longsor. Tata guna lahan di lokasi penelitian dapat dilihat di Gambar 10.



Gambar 10. Sebaran tata guna lahan lokasi penelitian

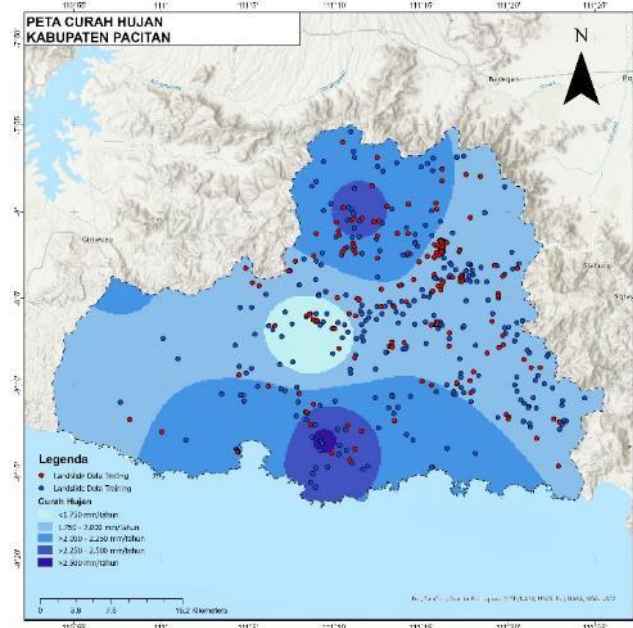
h. Curah Hujan/Rainfall

Curah hujan menjadi salah satu parameter penting yang berkontribusi pada terjadinya longsor karena curah hujan akan meningkatkan tekanan air pori pada suatu lereng, sehingga menyebabkan gaya penahan lereng menjadi berkurang (Misbahudin, 2020). Data analisis yang digunakan untuk interpolasi besaran curah hujan di lokasi penelitian berasal dari total 13 pos pengukuran air hujan milik Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo-Kementerian PU. Data curah hujan tersebut berasal dari hasil pengukuran curah hujan dari tahun 2020 hingga 2024, yang kemudian diambil nilai rata-rata curah hujannya, secara lebih detail dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pos Curah Hujan yang digunakan dalam interpolasi peta curah hujan di lokasi penelitian

No.	Pos Curah Hujan	Rata- Rata Curah Hujan (mm/tahun)	No.	Pos Curah Hujan	Rata- Rata Curah Hujan (mm/tahun)
1	PCH Pacitan	2.108,6	7	PCH Bangunsari-Ponorogo	1.876,4
2	PCH Kebonagung	2.538,16	8	PCH Purwantoro	1.972,9
3	PCH Arjosari	1.444,3	9	PCH Jatisrono	2.061,94
4	PCH Tegalombo	1.891,5	10	PCH Batuwarno	1.800
5	PCH Nawangan	2.331,92	11	PCH Giriwoyo	2.218,7
6	PCH Slahu	1.677,5	12	PCH Waduk Nawangan	2.032,64

Berdasarkan hasil interpolasi dengan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) pada ArcGIS Pro versi 3.3, curah hujan di lokasi penelitian berkisar antara 1.444 mm/tahun – 2.538 mm/tahun. Persebaran curah hujan di lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 11.

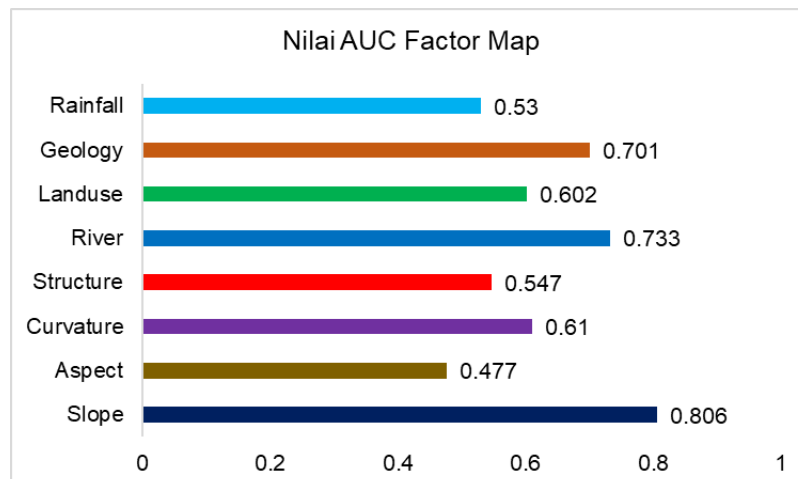


Gambar 11. Hasil interpolasi curah hujan lokasi penelitian

Analisis Kerentanan Tanah Longsor

Analisis kerentanan tanah longsor dapat dilakukan dengan menghitung kontribusi faktor-faktor penyebab longsor yang dianalisis dalam *Factor Map* dan hubungan antar faktor-faktor tersebut. Sebelum melakukan analisis model kerentanan tanah longsor, peta faktor penyebab longsor divalidasi terlebih dahulu dengan menggunakan Testing Data untuk menghasilkan nilai AUC dari setiap faktornya. Faktor yang memiliki nilai $AUC > 0,6$ kemudian akan digunakan untuk menyusun peta kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility map/LSM*) karena diidentifikasi memiliki kontribusi yang dominan terhadap terjadinya tanah longsor pada suatu daerah.

Dari total 8 *factor map* yang tersedia, sebanyak 5 *factor map* digunakan untuk penyusunan peta kerentanan tanah longsor, yaitu Peta Kemiringan Lereng/*Slope*, Peta Bentuk Lereng/*Curvature*, Peta Jarak dari Sungai/*River*, Peta Tata Guna Lahan/*Landuse*, Peta Geologi/*Geology* dengan rincian yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Nilai Area Under Cover (AUC) dari setiap *Factor Map* yang digunakan dalam penelitian

Selanjutnya, setiap *factor map* yang digunakan dalam penyusunan LSM dianalisis dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis untuk mengetahui secara numerik kekuatan hubungan antara kejadian longsor terdahulu dengan setiap *factor map* yang ada. Hasil analisis tersebut dapat dijabarkan secara detail menurut Tabel 3.

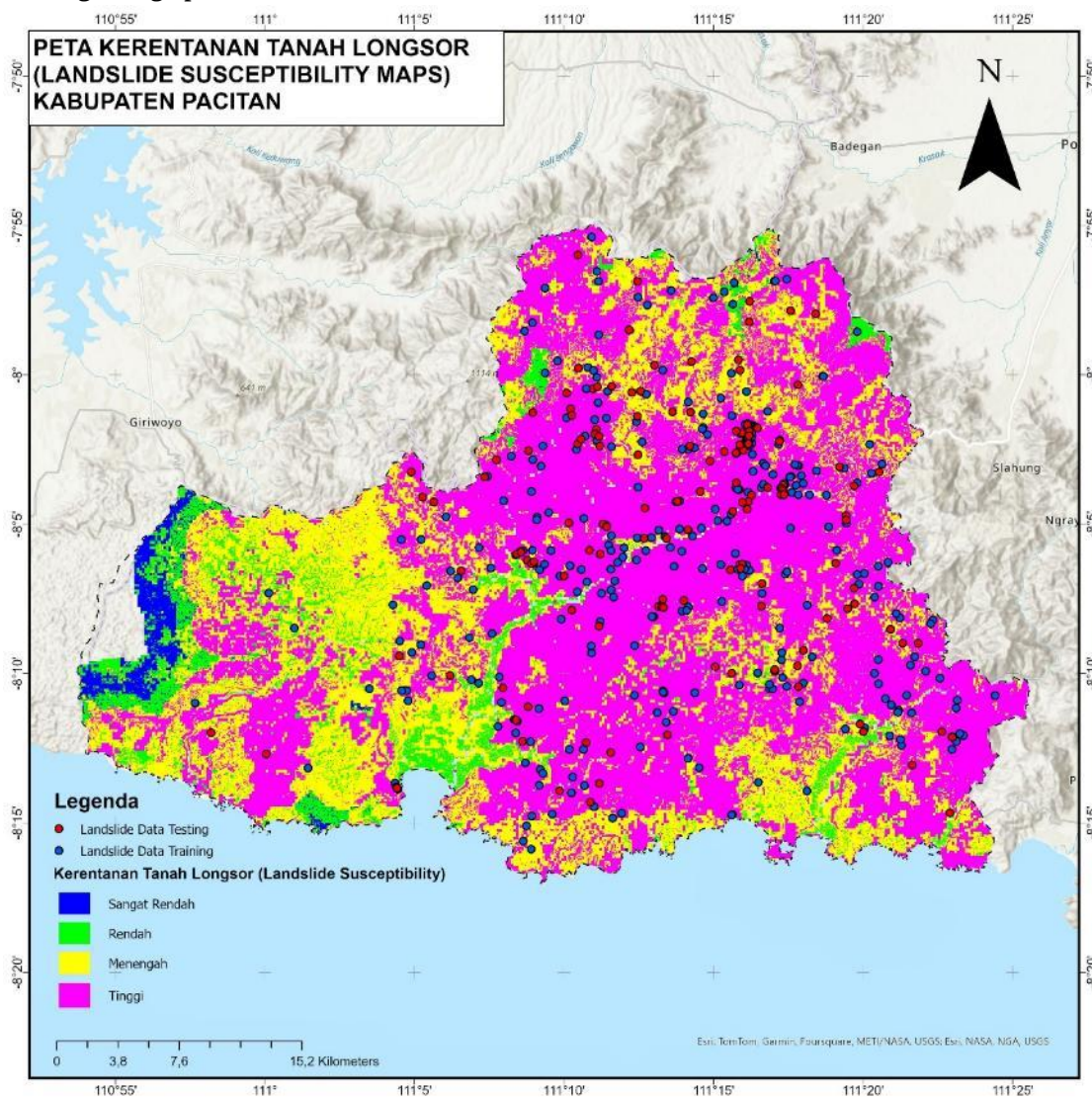
Tabel 3. Tabel analisis *Frequency Ratio* (FR) untuk setiap *Factor Map*, berfungsi sebagai penentuan kontribusi setiap faktor dalam penentuan kerentanan tanah longsor

CLASS	CLASS PIXEL $N_{pix}(X_j)$	FACTOR CLASS $N_{pix}(X_j)$ $\sum_{j=1}^n N_{pix}(X_j)$	LANDSLIDE PIXEL $(N_{pix}(LX_i))$	LANDSLIDE FACTOR $N_{pix}(LX_i)$ $\sum_{i=1}^m N_{pix}(LX_i)$	FR	RF	PR
Slope/Kemiringan Lereng (<i>FMslope</i>)							
0-2°	47434	0,029964	1	0,003021	0,10083	0,00948	4,69892
>2-5°	133422	0,084282	8	0,024169	0,28677	0,02696	
>5-8°	167597	0,105870	13	0,039275	0,37097	0,03488	
>8-17°	613386	0,387474	86	0,259819	0,67055	0,06305	
>17-24°	351537	0,222065	67	0,202417	0,91152	0,08571	
>24-33°	217375	0,137315	86	0,259819	1,89214	0,17791	
>33°	52288	0,033030	70	0,211480	6,40265	0,60201	
Total	1583039	1	331	1	10,63542	1	
Curvature/Bentuk Lereng (<i>FMcurvature</i>)							
Cekung (-)	237805	0,149409	56	0,169184	1,13235	0,37121	1
Datar (0)	614616	0,386154	98	0,296073	0,76672	0,25135	
Cembung (+)	739212	0,464436	177	0,534743	1,15138	0,37745	
Total	1591633	1	331	1	3,05046	1	
River/Jarak dari Sungai (<i>FMriver</i>)							
1000	1202594	0,763059	257	0,776435	1,01753	0,36670	3,45629
2000	267721	0,169872	68	0,205438	1,20937	0,43584	
3000	63074	0,040021	5	0,015106	0,37744	0,13602	
4000	27929	0,017721	1	0,003021	0,17048	0,06144	
5000	14700	0,009327	0	0	0	0	
Total	1576018	1	331	1	2,77483	1	
Landuse/Tata Guna Lahan (<i>FMlanduse</i>)							
Perkebunan/Kebun/ Vegetasi Non Budidaya Lainnya/Hutan Rimba	299056	0,189302	35	0,106383	0,56198	0,16697	3,30232
Tegalan/Ladang/ Semak Belukar	770874	0,487962	225	0,683891	1,40152	0,41642	
Sawah Tadah Hujan/Sawah	339255	0,214748	40	0,121581	0,56615	0,16822	
Pasir/Bukit Pasir Darat	36	0,000023	0	0,000000	0,00000	0,00000	
Permukiman dan Tempat Kegiatan	166570	0,105439	29	0,088146	0,83599	0,24839	
Danau/Situ	1275	0,000807	0	0,000000	0,00000	0,00000	
Padang Rumput	2717	0,001720	0	0,000000	0,00000	0,00000	
Total	1579783	1	329	1	3,36565	1	
Geology (<i>FMgeology</i>)							
Alluvium	82354	0,051735	7	0,021148	0,40878	0,03392	1,56026
Kalipucang Formation	211	0,000133	0	0,000000	0,00000	0,00000	
Dacite	12152	0,007634	4	0,012085	1,58301	0,13136	
Jaten Formation	86390	0,054270	21	0,063444	1,16904	0,09701	
Oyo Formation	49636	0,031181	2	0,006042	0,19378	0,01608	
Nampol Formation	41886	0,026313	4	0,012085	0,45926	0,03811	
Semilir Formation	42227	0,026527	8	0,024169	0,91111	0,07561	
Wuni Formation	59965	0,037670	4	0,012085	0,32080	0,02662	
Wonosari Formation	341960	0,214820	9	0,027190	0,12657	0,01050	
Arjosari Formation	363564	0,228392	112	0,338369	1,48153	0,12294	
Dayakan Formation	19962	0,012540	3	0,009063	0,72275	0,05998	
Intrusive Rocks	36489	0,022923	9	0,027190	1,18619	0,09843	
Mandalika Formation	292776	0,183923	68	0,205438	1,11698	0,09269	
Watupatok Formation	162270	0,101939	80	0,241692	2,37096	0,19675	
Total	1591842	1	331	1	12,05075	1	

Nilai FR yang terdapat pada tabel perhitungan tersebut menunjukkan kerentanan relatif terhadap terjadinya suatu longsor. Semakin tinggi nilai FR, akan semakin tinggi kerentanan suatu kelas/piksel terhadap longsor, sebaliknya, semakin rendah nilai FR, tingkat kerentanan suatu kelas/piksel terhadap longsor juga akan semakin rendah (Akgun dkk., 2008). Penyusunan peta kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility map*) dihitung dengan menggunakan nilai *landslide susceptibility index* yang dipengaruhi nilai FR yang telah divalidasi, dan kemudian diproses dengan menggunakan *Raster Calculator* dengan menggunakan *software* ArcGIS Pro versi 3.3 yang secara matematis dirumuskan sesuai persamaan 5.

$$LSM = 4,69892FM_{slope} + 1FM_{curvature} + 3,45629FM_{river} + 3,30232FM_{landuse} + 1,56026FM_{geology} \quad (5)$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, wilayah lokasi penelitian dibagi menjadi 4 zona yaitu Sangat Rendah, Rendah, Menengah, dan Tinggi (Gambar 13). Daerah yang masuk dalam zona kerentanan sangat rendah dan rendah secara umum memiliki kemiringan lereng 0-5°, cenderung jauh dari sungai, serta jenis batuan berupa batugamping dari Formasi Wonosari, sedangkan daerah dengan zona kerentanan tinggi cenderung memiliki kemiringan lereng di atas 17°, memiliki jarak dari sungai <1.000 meter, dan memiliki batuan penyusun berasal dari Formasi Arjosari dan Formasi Mandalika yang tersusun atas batuan sedimen dan batuan sedimen gunung api.



Gambar 13. Peta kerentanan tanah longsor (*landslide susceptibility maps*) di Kabupaten Pacitan menunjukkan dominasi zona kerentanan tanah longsor tinggi di Kabupaten Pacitan

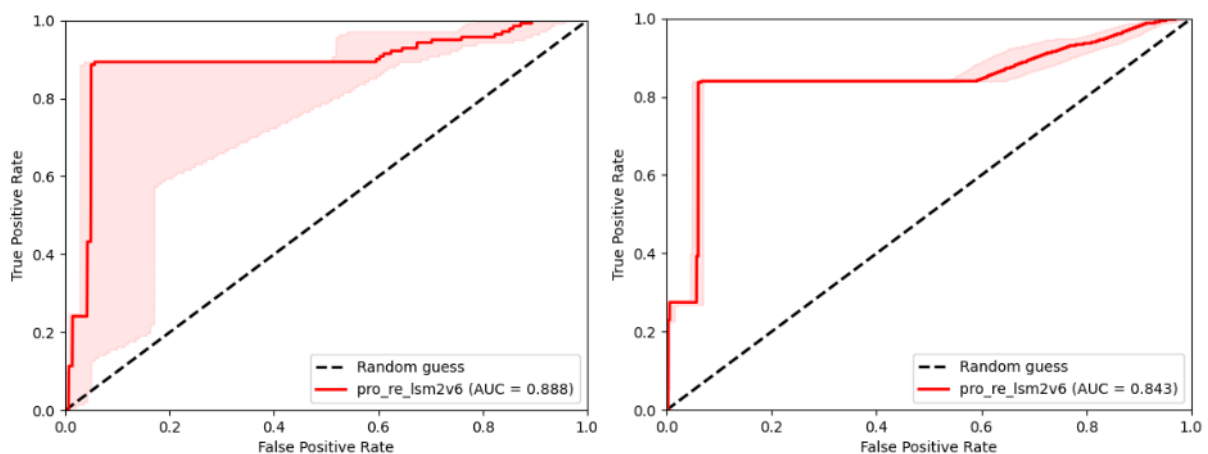
Hal yang menarik dari persebaran zona tersebut adalah beberapa titik longsor dapat ditemui pada radius <1.000 meter dari Sungai Grindulu, yang memberikan informasi bahwa Sungai Grindulu menjadi zona lemah bagi kondisi morfologi di Kabupaten Pacitan. Adapun secara lebih rinci Tabel 4 menunjukkan persebaran zona kerentanan tanah longsor di Kabupaten Pacitan. Kabupaten Pacitan, berdasarkan kerentanan terhadap tanah longsor, didominasi oleh zona kerentanan tanah longsor yang tinggi sebesar 58,66% dari luas daerahnya. Sebaliknya zona dengan kerentanan sangat rendah-hanya ditemui sebesar 1,63% dan 6,52% yang umumnya berlokasi di pusat dari Kabupaten Pacitan.

Tabel 4. Persentase persebaran zona kerentanan tanah longsor di Kabupaten Pacitan

Zona Kerentanan Tanah Longsor	Persentase dari Luas Daerah
Sangat Rendah	1,63%
Rendah	6,52%
Menengah	33,19%
Tinggi	58,66%

Validasi

Validasi terhadap model peta kerentanan tanah longsor dilakukan dengan memanfaatkan metode “Area Under Cover (AUC)” dari “Receiver Operating Characteristics (ROC)”. Validasi berfungsi untuk menggambarkan seberapa baik model dan faktor yang mempengaruhi model tersebut memprediksi kejadian longsor. Validasi peta kerentanan tanah longsor dilakukan dengan menggunakan baik *Training Data* (70%) maupun *Testing Data* (30%) (Arifianti dkk., 2020). Validasi menggunakan *training data* akan menghasilkan *Success Rate*, yaitu perhitungan keberhasilan suatu model yang menunjukkan seberapa baik model tersebut menggambarkan kejadian sebelumnya (Chung dan Fabbri, 2003; Wahono, 2010). Validasi menggunakan *testing data* akan menghasilkan *Prediction Rate*, yaitu penilaian prediktif yang menunjukkan seberapa baik model dapat memprediksi kejadian mendatang yang tidak diketahui atau kejadian posterior (Mezugh, 2011; Wahono, 2010). Dari hasil validasi tersebut didapatkan nilai AUC untuk *Success Rate* sebesar 0,843 sedangkan untuk *Prediction Rate* sebesar 0,888 (lihat Gambar 14). Hasil ini menunjukkan bahwa model kerentanan tanah longsor di Kabupaten Pacitan termasuk dalam model yang sangat baik (Regmi dkk., 2014).



Gambar 14. Hasil validasi *prediction rate* model kerentanan tanah longsor di Kabupaten Pacitan (kiri) dan hasil validasi *success rate* model kerentanan tanah longsor di Kabupaten Pacitan (kanan)

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Pembangunan model kerentanan tanah longsor dilakukan melalui analisis *Frequency Ratio* (FR) menghasilkan zona kerentanan sangat rendah, rendah, menengah dan tinggi, adapun lokasi penelitian di Kabupaten Pacitan didominasi oleh zona kerentanan sangat tinggi sebesar 58,66% dari total luas daerah, diikuti zona menengah (33,19%), zona rendah (6,52%), dan zona sangat rendah 1,63%). Penyusunan model dilakukan dengan menggunakan total 473 titik longsor serta 5 *factor map* yang memiliki nilai AUC >0,6, yaitu kemiringan lereng, bentuk lereng, jarak dari sungai, tata guna lahan, dan geologi. Berdasarkan hasil validasi model dengan menggunakan AUC of ROC didapatkan nilai AUC untuk *prediction rate* 0,888 dan untuk *success rate* sebesar 0,843, sehingga model tergolong sangat baik.

Diharapkan dengan hasil analisis ini mampu memberikan bahan pertimbangan bagi perencanaan tata ruang di Kabupaten Pacitan sekaligus mewujudkan harmoni antara geologi dan tata ruang. Lebih lanjut lagi, pembangunan infrastruktur sistem peringatan dini pada daerah dengan kerentanan longsor tinggi sangat penting untuk mencegah adanya potensi kerugian materil maupun korban jiwa.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kami sampaikan pada Pemerintah Kabupaten Pacitan dan Pemerintah Provinsi Jawa Timur atas bantuan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, T. D., & Lee, D. H. (2019). Landslide Susceptibility Mapping using Relative Frequency and Predictor Rate along Araniko Highway. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2), 763–776. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0156-x>
- Akgun, A., Dag, S., & Bulut, F. (2008). Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental Geology*, 54(6), 1127–1143. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0882-8>
- Akgun, A., & Türk, N. (2010). Landslide susceptibility mapping for Ayvalik (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis. *Environmental Earth Sciences*, 61(3), 595–611. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0373-1>
- Arifianti, Y., Pamela, P., Agustin, F., & Muslim, D. (2020). Comparative Study among Bivariate Statistical Models in Landslide Susceptibility Map. *Indonesian Journal on Geoscience*, 7(1), 51–63. <https://doi.org/10.17014/ijog.7.1.51-63>
- BPBD Kabupaten Pacitan, P. U. “Veteran” Y. (2022). *Kajian Risiko Bencana Kabupaten Pacitan 2022 – 2026*. Pemerintah Kabupaten Pacitan.
- BPS Kabupaten Pacitan. (2024). *Kabupaten Pacitan Dalam Angka, Pacitan Regency in Figures*.
- Chung, C.-J. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451–472. <https://doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b>
- Das, I. C. (2011). *Spatial statistical modelling for assessing landslide hazard and vulnerability* [University of Twente]. <https://doi.org/10.3990/1.9781607507468>
- Direktorat Pemetaan dan Evaluasi Risiko Bencana. (2021). *Kajian Risiko Bencana Nasional Provinsi Jawa Timur 2022-2026*. BNPB
- Fadilah, N., Arsyad, U., & Soma, A. S. (2019). ANALISIS TINGKAT KERAWANAN TANAH LONGSOR MENGGUNAKAN METODE FREKUENSI RASIO DI DAERAH ALIRAN SUNGAI BIALO. *PERENNIAL*, 15(1), 42. <https://doi.org/10.24259/perennial.v15i1.6317>

- Gao, Z., Ding, M., Huang, T., Liu, X., Hao, Z., Hu, X., & Chuanjie, X. (2022). Landslide risk assessment of high-mountain settlements using Gaussian process classification combined with improved weight-based generalized objective function. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102662. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102662>
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1–4), 181–216. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)
- Mersha, T., & Meten, M. (2020). GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 7(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00155-x>
- Mezughhi. (2011). Landslide Susceptibility Assessment using Frequency Ratio Model Applied to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli). *American Journal of Environmental Sciences*, 7(1), 43–50. <https://doi.org/10.3844/ajesp.2011.43.50>
- Misbahudin, M. (2020). Landslide susceptibility analysis in Kabandungan District and Salak Geothermal Field, West Java. *Jurnal Geografi Lingkungan Tropik*, 4(2). <https://doi.org/10.7454/jglitrop.v4i2.75>
- Regmi, A. D., Yoshida, K., Pourghasemi, H. R., Dhital, M. R., & Pradhan, B. (2014). Landslide susceptibility mapping along Bhalubang — Shiwapur area of mid-Western Nepal using frequency ratio and conditional probability models. *Journal of Mountain Science*, 11(5), 1266–1285. <https://doi.org/10.1007/s11629-013-2847-6>
- Samodra, H., Gapoer, S., Tjokrosapoetro, S. (1992). Peta Geologi Regional Lembar Pacitan Jawa. Badan Geologi: Pusat Survei Geologi
- Sampurno dan Samodra, H. (1997). Peta Geologi Regional Lembar Ponorogo Jawa. Badan Geologi: Pusat Survei Geologi
- Sampurno dan Samodra, H. (1997). Peta Geologi Regional Lembar Ponorogo Jawa. Badan Geologi: Pusat Survei Geologi
- Silalahi, F. E. S., Pamela, Arifianti, Y., & Hidayat, F. (2019). Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4>
- Sisay, T., Tesfaye, G., Jothimani, M., Reda, T. M., & Tadese, A. (2024). Landslide susceptibility mapping using combined geospatial, FR and AHP models: a case study from Ethiopia's highlands. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00730-4>
- Surono, Toha, B., Sudarno, I. (1992). Peta Geologi Regional Lembar Surakarta – Giritontro Jawa. Badan Geologi: Pusat Survei Geologi
- Wahono, B. F. D. (2010). Applications of Statistical and Heuristic Methods for Landslide Susceptibility Assessments. Unpublished Technical Report, Yogyakarta: Gadjah Mada University and International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation
- Yalcin, A., & Bulut, F. (2007). Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). *Natural Hazards*, 41(1), 201–226. <https://doi.org/10.1007/s11069-006-9030-0>
- Yang, I. T., Acharya, T. D., & Lee, D. H. (2016). Landslide Susceptibility Mapping for 2015 Earthquake Region of Sindhupalchowk, Nepal using Frequency Ratio. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 34(4), 443–451. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.4.443>